

**Б. П. СЕРЕДА, И. В. КРУГЛЯК, Д. О. КРУГЛЯК****ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ХРОМИРОВАННЫХ ДИФФУЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ НАСЫЩАЮЩИХ СРЕД**

Рассмотрена инновационная технология формирования хромированных покрытий с использованием композиционных насыщающих сред на конструкционных материалах и сплавах. исследованы закономерности и механизмы формирования диффузионных покрытий. установлена зависимость толщины покрытий от технологических параметров процесса. С использованием методов математического моделирования разработаны оптимальные составы композиционных насыщающих сред для нанесения комплексных покрытий. Изучено влияние составов композиционных насыщающих сред на свойства полученных покрытий. С целью анализа процесса формирования хромированных диффузионных покрытий с использованием композиционных насыщающих сред выполнен расчет равновесного состояния продуктов реакций в многокомпонентных композиционных системах.

**Ключевые слова:** химические транспортные реакции, композиционные насыщающие среды, покрытие, математическое моделирование, коррозионная стойкость, диффузия, плотность, пористость, микротвердость.

**Б. П. СЕРЕДА, І. В. КРУГЛЯК, Д. О. КРУГЛЯК****ІННОВАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ ХРОМОВАНИХ ДИФУЗІЙНИХ ПОКРИТТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМПОЗИЦІЙНИХ НАСИЩУЮЧИХ СРЕД**

Розглянуто інноваційна технологія формування хромованих покриттів з використанням композиційних насичуючих середовищ на конструкційних матеріалах і сплавах. досліджено закономірності і механізми формування дифузійних покриттів. встановлена залежність товщини покриттів від технологічних параметрів процесу. З використанням методів математичного моделювання розроблено оптимальні складі композиційних насичуючих середовищ для нанесення комплексних покриттів. Вивчено вплив складів композиційних насичуючих середовищ на властивості отриманих покриттів. з метою аналізу процесу формування хромованих дифузійних покриттів з використанням композиційних насичуючих середовищ виконаний розрахунок рівноважного стану продуктів реакцій в багатоконпонентних композиційних системах.

**Ключові слова:** хімічні транспортні реакції, композиційні насичуючі середовища, покриття, математичне моделювання, корозійна стійкість, дифузія, щільність, пористість, мікротвердість.

**B. P. SEREDA, I. V. KRUGLYAK, D. O. KRUGLYAK****INNOVATIVE TECHNOLOGY OF OBTAINING CHROMATED DIFFUSION COATINGS USING COMPOSITE POWDER MEDIUM**

An innovative technology for the formation of chrome-plated coatings with the use of 6m composite saturating media on structural materials and alloys is considered. The laws and mechanisms of the formation of diffusion coatings are investigated. The dependence of the thickness of the coatings on the technological parameters of the process was established. Using the methods of mathematical modeling, optimal compositions of composite saturating media have been developed for the application of complex coatings. In this paper, the technology of chemical-heat treatment of steels under non-stationary temperature conditions combined with chemical gas transport reactions is considered. The effect of the composition of saturating composite media on the properties of the coatings obtained was studied. The process of chromium plating, like boronation, is an effective method of increasing the reliability and durability of machine parts, tools and tooling by creating chromium-plated layers on the surface of the workpiece with a unique set of physicochemical properties. For the purpose of analyzing the process of the formation of chromated diffusion coatings using composite saturating media, the equilibrium state of the reaction products in multicomponent composite systems has been calculated. Chrome coatings on steels and alloys can significantly improve the corrosion resistance, heat resistance, hardness and wear resistance, and often get the required combinations.

**Keywords:** chemical transport reactions, composite saturating media, coating, mathematical modeling, corrosion resistance, diffusion, density, porosity, microhardness.

**Введение.** В связи с ускоренным развитием техники крайне актуальными стали вопросы повышения надежности и долговечности деталей машин, приборов, установок, повышения их качества и эффективности работы. а, следовательно, вопросы экономии металлов, борьбы с коррозией и износом деталей машин.

Решение этих задач связано с упрочнением поверхностных слоев изделий [1–6]. Роль их в долговечности машин и механизмов особенно возросла в настоящее время, так как развитие большинства отраслей промышленности связано с повышением нагрузок, температур, агрессивности сред, в которых работает деталь.

Процесс хромирования, как и борирования, является эффективным методом повышения надежности и долговечности деталей машин, инструмента и технологической оснастки благодаря

созданию на поверхности обрабатываемых деталей хромированных слоев, обладающих уникальным комплексом физико-химических свойств [7].

В данной работе рассмотрена технология химико-термической обработки сталей при нестационарных температурных условиях совмещенная с химическими газотранспортными реакциями [8–11].

Изменить свойства поверхности в необходимом направлении можно различными способами. Их можно условно разделить на два вида: 1) нанесение на поверхность нового материала с необходимыми свойствами; 2) изменение состава поверхностного слоя металла, обеспечивающего желаемое изменение свойств.

В первом случае применяют такие хорошо известные покрытия, как гальванические, химические и др. На поверхность металлических сплавов наносят

и неметаллические материалы – эмаль, краску, различного рода синтетические материалы.

Во втором случае поверхностные слои металла подвергают диффузионной химико-термической обработке (ХТО), в результате которой на поверхности изделия образуется новый, отличающийся от сердцевины сплав.

ХТО позволяет получить в поверхностном слое изделия сплав практически любого состава, и обеспечить комплекс необходимых свойств – физических, химических, механических и др.

Среди методов поверхностного упрочнения широкое применение находят хромированные покрытия, полученные различными способами.

Хромированные покрытия на сталях и сплавах позволяют значительно повысить коррозионную стойкость, жаростойкость, твердость и износостойкость, а зачастую получить и требуемые их сочетания.

Однако все известные порошковые методы энергоемки и продолжительны. В этой связи разработка новых композиционных насыщающих сред является актуальной. Разработка новых технологий, позволяющих регулировать состав и структуру покрытий, обеспечивать необходимые эксплуатационные характеристики при минимальном времени их формирования.

**Целью данной работы** является создание диффузионных покрытий из композиционных порошков на основе хрома и тугоплавких металлов с высокой насыщающей способностью, полученных при нестационарных температурных условиях.

**Материалы исследований.** Химико-термическая обработка углеродистых сталей проводилась в реакторе открытого типа в рабочем интервале температур 950–1050°C при продолжительности изотермической выдержки 30–60 мин. В качестве насыщающих сред применяли смеси порошков оксидов хрома и алюминия, хрома, титана, кремния, алюминия, металлического йода и хлористого аммония (газотранспортные агенты), окиси иттрия, окиси лантана дисперсностью 60–120 мкм.

Подготовка поверхности образцов включала последовательные стадии шлифовки, полировки и обезжиривания в ацетоне. Инициирование процесса насыщения осуществляли путем предварительного нагрева в печи сопротивления до температуры начала самовоспламенения (скорость нагрева – 0,5°C/с). Температуры композиционной насыщающей шихты контролировали хромель-алюмелевой термопарой в защитном чехле, введенной непосредственно в объем шихты, и подключенной к потенциометру серии КСП.

Толщину упрочненных слоев исследовали на световом микроскопе "Neophot-21" и "Neophot-32" при увеличении  $\times 150$  –  $\times 500$ . Микроструктуру выявляли методом травления в 3% спиртовом растворе пикриновой кислоты (ТУ 6-09-08-317-80). Для выявления границ зерен феррита использовали 4% спиртовой раствор азотной кислоты [12].

Исследование элементного состава проводили методом микрорентгеноспектрального анализа с применением микроанализатора JEOL "Superprob-733". Локальность анализа 1 мкм<sup>2</sup>, глубина анализа ~ 1 мкм. Микротвердость покрытий определяли на приборе ПМТ-3. Коррозионную стойкость образцов с покрытиями оценивали в 10%-м растворе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> при температуре 20°C. Для расчета равновесного состава продуктов системы были использованы прикладные пакеты программ "АСТРА.4" и TERRA [13].

При разработке составов порошковых композиционных насыщающих сред, обеспечивающих высокую коррозионную стойкость, использовали методы математического планирования эксперимента с реализацией полного факторного анализа по плану 2<sup>3</sup> и дробного факторного эксперимента 2<sup>4-1</sup>.

Выбор оптимального состава композиционных насыщающих сред при нестационарных температурных условиях проводили на основании результатов исследований тепловой кинетики процесса и физико-механических свойств защитных покрытий (в качестве функций отклика была выбрана коррозионная стойкость покрытий).

Параметры оптимизации:

$Y_1$  – показатели коррозионной стойкости,  $\tau_{\text{исп.}}$  – 25 ч, для системы Al-Cr-Si;

В качестве независимых переменных были выбраны: содержание в композиционных насыщающих средах хромистой составляющей, хрома, алюминия, кремния. В качестве исходного материала была выбрана техническое железо и сталь 20. Активатором процесса является J<sub>2</sub> в количестве 1% масс. и 4% NH<sub>4</sub>Cl для всех систем.

Для получения стопроцентного состава композиционных насыщающих сред в качестве конечного продукта использовался Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Результатом эксперимента должна стать математическая зависимость между исследуемыми характеристиками в виде функциональной связи  $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m)$ .

В результате регрессивного анализа были получены ряд уравнений, показывающие зависимость коррозионной стойкости защитных покрытий от режима диффузионного насыщения и содержания легирующих элементов.

Результаты расчетов были сопоставлены с экспериментальными исследованиями.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Известно, что содержание углерода в стали предопределяет структуру формируемых покрытий и, соответственно, их эксплуатационные свойства. На высокоуглеродистых сталях покрытия представляют собой, в зависимости от условий реализации процесса, преимущественно карбидную фазу, отвечающую по составу соединениям (Cr,Fe)<sub>23</sub>C<sub>6</sub> и (Cr,Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, а при диффузионном хромировании с использованием хлорида аммония на поверхности образуется и слой карбонитридов состава Fe<sub>2</sub>(N,C) и Fe<sub>4</sub>(N,C) [14]. На среднеуглеродистых сталях, в основном, образуются сложные покрытия с карбидной фазой, под которой расположен слой твердого раствора хрома в железе с

включениями карбидов хрома и безуглеродистая зона (зона с пониженной концентрацией хрома и углерода). На низкоуглеродистых сталях формируется покрытие, представляющее собой раствор хрома в железе, под которым располагается безуглеродистая зона [15].

Авторы работы [16], характеризуя тройную систему «железо-хром-углерод», образованную в процессе формирования карбидного слоя на сталях, отмечают наличие следующих фаз:

- $Cr_{23}C_6$ , которая имеет структуру гранецентрированного куба и находится в равновесии со смешанными карбидами состава 60,1 % Cr; 34,4 % Fe; 5,5 % C;

- гексагональной  $Cr_7C_3$  в равновесии с карбидами состава:  $Fe_2Cr_3C_3$  (63,8 % Cr; 27,3 % Fe и 8,9 % C) и  $Fe_4Cr_3C_3$  (53,8 % Fe, 37,6 % Cr и 8,6 % C)

- карбида железа  $Fe_3C$ , который способен растворить до 20 % Cr;

- $Cr_3C_2$ , которую практически не обнаруживают большинство исследователей.

Для упрощения рассмотрения данного вопроса в дальнейшем, согласно общепринятому мнению, будем полагать, что карбидный слой состоит из  $Cr_{23}C_6$  и  $Cr_7C_3$ .

Размеры покрытий на сталях, их структура и фазовый состав обусловлены условиями формирования покрытий под воздействием постоянно изменяющихся факторов. В данном случае сказывается определяющая роль соотношения встречных массовых потоков хрома (извне) и углерода и железа (с насыщаемой матрицы) в строго конкретные температурно-временные интервалы процесса диффузионного хромирования. Характеристиками встречных массовых потоков углерода и хрома в матрице служат их коэффициенты диффузии  $D_{Cr}$  и  $D_C$ , а в приповерхностной зоне – коэффициенты массопереноса  $\beta_{Cr}$  и  $\beta_C$ .

Коэффициенты диффузии являются функциями температуры и концентрации, а коэффициенты массопереноса – функциями температуры и активности среды в зоне насыщения и имеют различный характер изменения зависимости от температуры. По-этому, различные температурно-временные режимы нагрева образцов до температуры насыщения создают условия для зарождения и начального формирования покрытия при различных соотношениях потоков массы хрома и углерода, то есть величина соотношения потоков массы хрома и углерода при одних температурных условиях может значительно отличаться от его величины при другой температуре. Поэтому в начальный период процесса создаются условия для преимущественного зарождения карбидной фазы различной структуры или раствора хрома в железе, которые в значительной степени предопределяют и дальнейшее формирование покрытия. Данные выводы подтверждаются результатами диффузионного хромирования в стационарных и подвижных смесях.

Формирование покрытия на низкоуглеродистой стали в смеси на основе высокоуглеродистого

феррохрома обеспечивает реализацию процесса карбохромирования, что позволяет получить на поверхности образца тонкий (5...7 мкм) слой карбида хрома. Попытки получить более толстый слой на низкоуглеродистых сталях не увенчались успехом даже после хромирования в течение 6 ч. В то же время на высокоуглеродистых сталях, в течение 3...4 ч получают слой толщиной более 30 мкм.

Если исходить из того, что активность среды одинаковая (хромирование образцов с различным содержанием углерода осуществляли совместно), а толщина сформированного слоя и интенсивность осаждения, согласно рис. 2, значительно отличается, то остается согласиться с фактом определяющей роли углерода, диффундирующего из основы через карбидный слой, в формировании покрытий, то есть после образования на стали тонкого карбидного слоя дальнейший рост покрытия осуществляется наружу в связи с тем, что диффузионная подвижность углерода в карбидном слое заметно выше, чем у хрома. Скорость диффузии углерода через карбидный слой обеспечивает разность его химических потенциалов под слоем и в насыщающей среде. Поэтому, чем выше содержание углерода в стали и ниже углеродный потенциал газовой среды, тем более активно растет карбидный слой.

Использование высокоуглеродистого феррохрома повышает химический потенциал углерода насыщающей среды, что снижает диффузионный массовый поток углерода через сформированный карбидный слой и соответственно скорость его роста.

Анализ реакций, происходящих при нестационарных температурных условиях, результатов металлографических исследований фазового состава слоев позволил определить схему образования покрытий. Процесс условно можно разделить на несколько стадий [17]:

- 1- инертный прогрев реакционной смеси до температуры воспламенения;
- 2- тепловое самовоспламенение;
- 3- прогрев изделий;
- 4- изотермическая выдержка;
- 5- охлаждение.

Получение покрытий при нестационарных температурных условиях происходит, когда ни тепловое, ни химическое равновесие до полного завершения процесса и остывания продуктов является невозможным. Скорости протекания химических процессов определяются кинетическими закономерностями, зависящими от температуры и диффузионных факторов. Если предположить, что на стадии прогрева торможение диффузионных процессов в газовой фазе невелико, а скорость изменения температуры мала по сравнению со скоростью протекания газофазных химических реакций, то можно считать, что каждому температурному значению соответствует равновесный состав продуктов. Рассчитывая равновесный состав продуктов реакций для ряда конкретных температур из диапазона ее изменения, можно проследить за

развитием процесса ХТО и предположить механизм образования покрытий.

Термодинамическая модель процесса сводится к следующему: исходная смесь состоит из  $M$  веществ, содержащих  $l$  химических элементов. При фиксированных значениях объема и температуры из этих элементов в результате химических реакций могут образоваться  $m_k$  веществ, присутствующих в  $k=0,1,\dots,q$  различных фазах. Набор веществ включает  $l$  атомарных и  $(m-l)$  молекулярных компонентов, реакции которых представлены в форме уравнений диссоциации. Математическая формулировка задачи сводится к минимизации термодинамического потенциала.

Исследования показывают, что в диапазоне температур 800 – 1300 К основными соединениями в газовой фазе являются йодиды  $Cl_4$ ,  $Al_2I_6$ ,  $AlI_3$ ,  $AlI_2$ ,  $AlI$ ,  $SiI_4$ ,  $SiI_3$ ,  $SiI_2$ ,  $SiI$ ,  $CrI_2$ ,  $CrI$ ,  $CrI_3$  (преобладают йодиды  $Ti$  и  $Al$ ), а также йод в атомарном и молекулярном виде.

Стадия инертного прогрева реакционной смеси до температуры воспламенения сопровождается испарением и распадом газотранспортных носителей до атомарного состояния по реакции



В интервале температур 300–1800 К концентрация газообразных  $I_2$  и  $I$  непрерывно возрастает.

На стадии теплового самовоспламенения протекает экзотермическая реакция восстановления оксида хрома

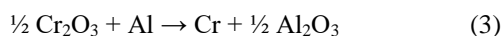


Температура в реакторе резко повышается до максимальной температуры процесса  $t_m$ . Происходит образование газообразных соединений и перенос основных насыщающих элементов к подложке по реакции  $M+m/n \quad Gn \leftrightarrow MG^m$ , где  $M$  – наносимый элемент,  $Gn$  – галоген,  $MG^m$  – летучий галогенид.

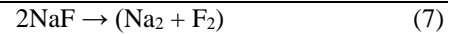
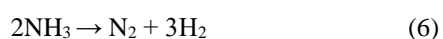
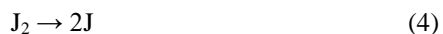
При этом необходимо, чтобы транспортируемый элемент и подложка находились в разных температурных зонах. На стадии теплового самовоспламенения происходит образованием газообразных йодидов  $Al$ ,  $Si$  и их химический транспорт к поверхности изделий.

Термодинамический анализ равновесного состава продуктов системы свидетельствует, что в исследуемом диапазоне температур насыщающие элементы реакционной смеси взаимодействуют с йодом как в атомарном, так и в молекулярном состоянии, однако более вероятны реакции взаимодействия элементов с атомарным йодом:

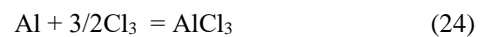
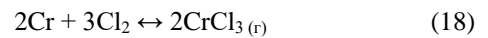
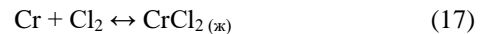
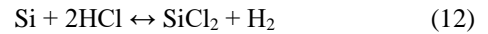
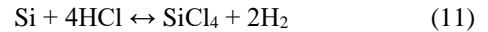
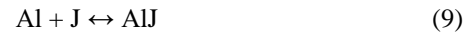
1. Металлотермическая реакция:



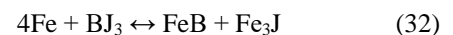
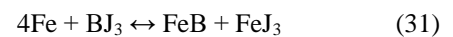
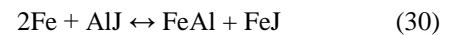
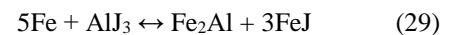
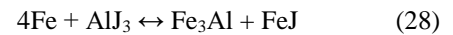
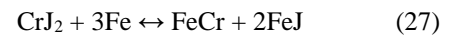
2. Реакции разпада газотранспортного носителя:



3. Хімічні транспортні реакції (диспропорціонування, терморозпад):



4. Реакції обміну з підкладкою:





На стадии прогрева изделий происходит выравнивание температуры по объему контейнера и формирование диффузионно-активных атомов элементов. При внесении в порошковую систему стальных изделий на их поверхности возможно протекание гетерогенных реакций обмена с железом подложки.

На стадии изотермической выдержки происходит диффузионный рост покрытия, температура в реакторе не изменяется.

На стадии охлаждения формирование слоев происходит менее интенсивно, что связано с уменьшением коэффициентов диффузии насыщающих элементов. При этом большое влияние на качество покрытия имеет скорость охлаждения.

Эффективность обработки определяется временными параметрами процесса обработки и теплофизическими характеристиками шихты.

Экспериментально установлено, что при повышении температуры насыщения и увеличении длительности изотермической выдержки происходит рост толщины диффузионного слоя (рис. 1).

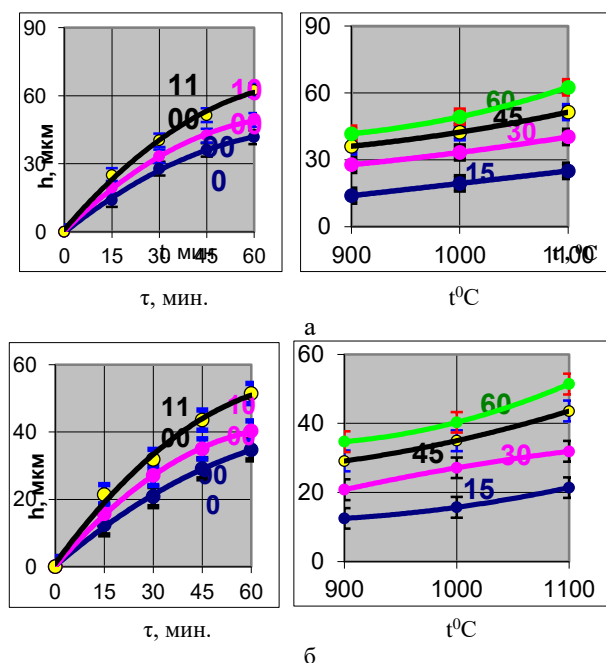


Рис. 1 – Влияние температуры процесса ( $t$ ) и времени выдержки ( $\tau$ ) на толщину слоя, легированного хромом и алюминием, полученные при нестационарных температурных условиях. Материал подложки: а – техническое железо; б – сталь 20

Покрyтия, получаемые при нестационарных температурных условиях, состоят из диффузионной зоны. Установлено, что на поверхности сталей формируется силицид  $(\text{Fe}, \text{Al})_3\text{Si}_2$ , под которым расположен  $\alpha$  – твердый раствор титана, хрома и кремния в железе, столбчатого строения.

На сталях 45 и У8А на поверхности наблюдается карбид  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  и  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ .

Проведенные испытания покрытий на коррозионную стойкость показали повышение этого показателя в 1,5–1,7 раза по сравнению с диффузионными покрытиями, полученными в изотермических условиях.

#### Список литературы

1. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справочник / под ред. Ляховича Л.С. – М.: Металлургия. – 1981. – 424 с.
2. Ворошнин Л. Г. Антикоррозионные диффузионные покрытия – Минск: Наука и техника, 1981 – 296 с.
3. Лахтин Ю. М., Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка металлов. Учебное пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.
4. Середя Б. П. Поверхневе зміцнення матеріалів: Монографія / Середя Б. П., Калініна Н. Є., Кругляк І. В. – Запоріжжя: РВВ ЗДІА, – 2004. – 230 с.
5. Середя Б. П. Металознавство та термічна обробка чорних та кольорових металів. Підручник. – Запоріжжя: Вид-во ЗДІА, 2008. – 302 с.
6. Филоненко Б. А. Комплексные диффузионные покрытия. М.: Машиностроение. 1981 – 137 с.
7. Кухарева Н. Г., Галынская Н.А. Петрович С.Н. Диффузионные покрытия, полученные из композиционных борнующих сред. Наука и техника. – 2013. – Выпуск 5. – С. 21–26.
8. Коган Я. Д., Середя Б. П., Штессель Э. А. Высокоинтенсивный способ получения покрытий в условиях СВЧ / Металловедение и термическая обработка металлов, 1991, №6. – с.39–40.
9. Sereda B. Aluminized Multifunctional Coating on Steel in SHS Condition. / Sereda D., Sereda B. // Material science and technology. Pittsburgh. Pennsylvania, USA 2014. – P.482-486.
10. Sereda B. Advanced Chromoaluminizing Coatings for Wear and Heat-resistance on Composite Materials under SHS. / Sereda D., Sereda B. // Material science and technology. Columbus, OH, USA, 2015. – P.229–232.
11. Sereda B., Sereda D. Development of Protective Coatings Formulations Based on Boron for Units Operating at High Temperatures in Metallurgy. Material science and technology 2016. Conference and Exhibition. Salt Lake City, Utah USA 2012-1550p.- P. 931–934
12. Sereda B. Development of Protective Coatings Formulations Based on Boron for Units Operating at High Temperatures in Metallurgy / Sereda D., Sereda B. // Material science and technology– 2016. Salt Lake City, Utah USA 2016. – P.931–934.
13. Середя Б. П., Палехова И. В., Белокоп Ю. А., Середя Д. Б. Получение интерметаллидных соединений и покрытий при нестационарных температурных условиях. Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении: Научный журнал № 2, 2014. ЗНТУ, Запорожье. – С.67–71
14. Похмурский, В. И. Повышение долговечности деталей машин с помощью диффузионных покрытий [Текст] / В. И. Похмурский, В. Б. Далисов, В. М. Голубец. – Киев : Наукова думка, 1980. – 187 с.
15. Дубинин, Г. Н. Диффузионное хромирование сплавов [Текст] / Г. Н. Дубинин. – М.: Машиностроение, 1964. – 451 с.
16. Ebersbach, G. Chromkarbid-behandlung von Werkzeugen und Bauteilen [Text] / G. Ebersbach, G. Ullrich // Die Technik. – 24 Jg., Heft., 1965.
17. Sereda B. Production of highly effective SHS coatings operating in oxidizing and corrosive environments / Sereda B., Sereda D., Krygalyak I. // Material science and technology – 2017. Pittsburgh. Pennsylvania USA. 2017. – P.424–429

#### References (transliterated)

1. Chemical-heat treatment of metals and alloys: a Handbook / ed. Lyakhovich L.S. – Moscow: Metallurgy. – 1981. – 424 p (in Russian).
2. Voroshnin L. G. Anti-corrosion diffusion coatings – Minsk: Science and technology. – 1981. – 296 p. (in Russian).
3. Lakhtin Yu. M., Arzamasov B.N. Chemical and heat treatment of metals. Textbook for universities. – Moscow: Metallurgy. – 1985. – 256 p. (in Russian).

4. Sereda B.P. Poverneve zmitsennyya material: Monographs / Sereda B.P., Kalinina N.C., Kruglyak I.V. – Zaporizhzhya: RVV ZDIA – 2004. – 230 p. (in Russian).
5. Sereda B.P. Metallurgy and Thermal Treatment of Ferrous and Non-Ferrous Metals. Textbook. – Zaporizhzhia: View of ZGIA, 2008. – 302 p. (in Russian).
6. Filonenko B. A. Complex diffusion coatings. – Moscow: Mechanical engineering. – 1981 – 137 p. (in Russian).
7. Kukhareva N.G., Galynskaya N.A. Petrovich SN Diffusion coatings obtained from composite boring media. Science and technology. – 2013. – Issue 5. – P. 21–26 (in Russian).
8. Kogan Y.D., Sereda B.P., Shtessel E. A. High-intensity method of obtaining coatings in the conditions of SWS / Metallurgy and thermal treatment of metals, 1991, No. 6. – p. 39–40 (in Russian).
9. Sereda B. Aluminized Multifunctional Coating on Steel in SHS Condition. / Sereda D., Sereda B. //Material science and technology. Pittsburgh. Pennsylvania. – USA 2014. – P.482-486(references).
10. Sereda B. Advanced Chromoaluminizing Coatings for Wear and Heat-resistance on Composite Materials under SHS. / Sereda D., Sereda B. // Material science and technology. – Columbus, OH, USA. – 2015. – P.229-232(references).
11. Sereda B., Sereda D. Development of Protective Coatings Formulations Based on Boron for Units Operating at High Temperatures in Metallurgy. Material science and technology 2016. Conference and Exhibition. Salt Lake City, Utah USA 2012-1550p.- P.931-934(references).
12. Sereda B. Development of Protective Coatings Formulations Based on Boron for Units Operating at High Temperatures in Metallurgy / Sereda D., Sereda B. // Material science and technology– 2016. Salt Lake City, Utah USA 2016. – P.931-934(references).
13. Sereda B.P., Palekhova IV, Belokon Y.A., Sereda D. B. Preparation of intermetallic compounds and coatings under non-stationary temperature conditions. New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering: Scientific journal. – No2. – 2014. – ZNTU. – P. 67–71 (in Russian).
14. Pokhmursky, V.I. Increase in durability of machine parts by means of diffusion coatings [Text] / VI I. Pokhmursky, V. B. Dalisov, V. M. Golubets. – Kyiv: Scientific Opinion. – 1980. – 187 pp (in Russian).
15. Dubinin, GN, Diffusion Chromium Alloys [Text] / G. N. Dubinin. – Moscow: Mashinostroenie. – 1964. – 451 pp. (in Russian).
16. Ebersbach, G. Chromkarbid-behandlung von Werkzeugen und Bauteilen [Text] / G. Ebersbach, G. Ullrich // Die Technik. – 24 Jg., Heft., 1965(references).
17. Sereda B. Production of highly effective SHS coatings operating in oxidizing and corrosive environments / Sereda B., Sereda D., Krygylak I. // Material science and technology – 2017. Pittsburgh. Pennsylvania USA. 2017. – P.424–429(references).

Поступила (received) 27.10.2018

#### Відомості про авторів /Сведения об авторах / About the Authors

**Середа Борис Петрович (Середа Борис Петрович, Sereda Borys Petrovich)** – научный руководитель научно-исследовательского центра "Материаловедения и инновационных технологий", доктор технических наук, профессор Днепропетровского государственного технического университета, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9518-381X>; e-mail: [seredabp@ukr.net](mailto:seredabp@ukr.net)

**Кругляк Ирина Васильевна (Кругляк Ірина Василівна, Kruglyak Irina Vasilievna)** – докторант кафедры «Автомобілі та автомобільне господарство» Днепропетровского государственного технического университета, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9518-381X>; e-mail: [seredabp@ukr.net](mailto:seredabp@ukr.net)

**Кругляк Дмитрий Олегович (Кругляк Дмитро Олегович, Kruglyak Dmitry Olegovich)** – доцент кафедры «Обработки металлов давлением», Запорожского национального университета, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7812-8360>; e-mail: [seredabp@ukr.net](mailto:seredabp@ukr.net)